ниях, принятых нами в работе [3], и уточним некоторые формулировки для лучшего понимания дальнейшего изложения:

$$\rho(\tau)=\rho(N_i)\left[1-\exp\left(-\frac{\ln 2\cdot\tau}{T_{Pm}}\right)\right], \quad (1)$$

где $\rho(N_i)$ – значение максимума прометиевого провала для такой мощности $N_i$, которой соответствует фактическая концентрация прометия на момент останова реактора.

Подчеркнем основные особенности этих режимов.

Они характеризуются, прежде всего, тем, что весь имеющийся в активной зоне реактора на момент останова прометий со временем распадается, тем самым, увеличивая концентрацию самария и связанную с ним потерю реактивности на отравление.

Т... период полураспада прометия равен $T_{Pm}\approx 2,23$ сут, то через 11,5 сут. (с погрешностью около 3 % через 5 периодов полураспада) глубина прометиевого провала в соответствии с (1) достигнет максимума. Очевидно, что точно также будет ...ать $^{149}_{61}Pm$ и достижение равновесной концентрации на новой рабочей мощности реактора $N_2$.

Равновесное отравление самарием и максимальная глубина прометиевого провала при останове с номинальной мощности отличаются для разных типов тепловых реакторов. Для УТР равновесное отравле...но – $\rho_{Sm,0}$ = – 0,7 % [2], а максимальный провал $\rho \approx$ –0,39 % по уточненным данным работы [3].

Глубина прометиевого провала пропорциональна фактической концентрации прометия в зоне

$$c(N_i)=c(N_{ном})\frac{N_i}{N_{ном}}\approx-\frac{0,39}{100}N_i. \quad (2)$$

Качественный характер зависимости видно из сравнения режимов a) и b) или c) и d).

Если останов произошел с номинальной мощности и при этом уже были достигнуты равновесные концентрации прометия и самария, см. рис. 1, режим a, то отравление самарием приблизительно через 11 сут. примет какое-то предельное для данного реактора значение. Так, например, уточненное предельное значение для УТР [3] будет равно

$$\rho^{lim}=\rho_{Sm,0}+\rho(100\,\%)\approx-1,09\,\%.$$

По по... абсолютных значений эффектов от... ие $^{149}_{62}Sm$ почти на порядок меньше отравления $^{135}_{54}Xe$.

Однако необходимо помнить, что если отравление ксеноном в зависимости от плотности потока тепловых нейтронов носит «насыщающий» характер и по оценкам в максимуме йодной ямы не будет превышать приблизительно –10 %, то глубина прометиевого провала нарастает пропорционально потоку и может привести к «самариевой смерти» реактора. Это обстоятельство ограничивает диапазон изменения потока тепловых нейтронов в реакторе и требует его постоянного контроля.

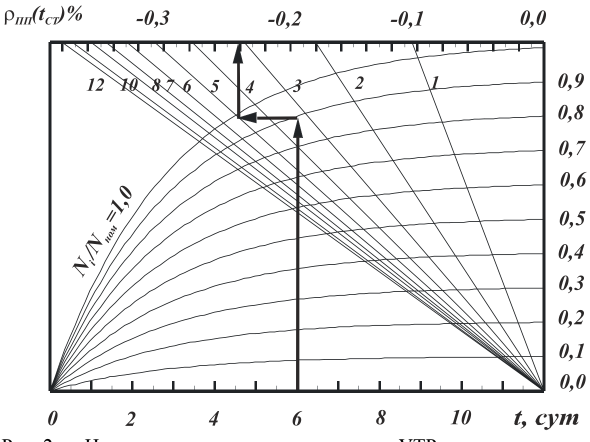



Рис. 2. Номограмма режима пуска свежего УТР

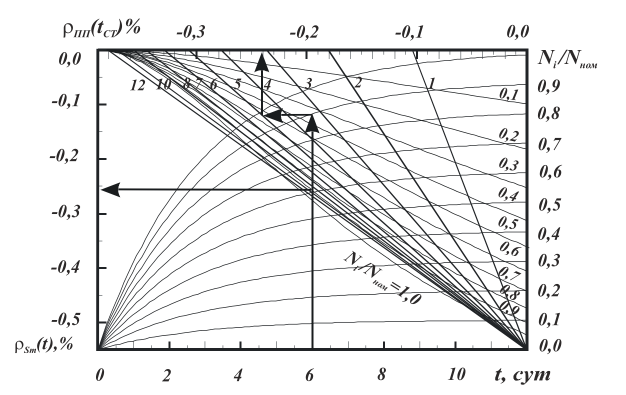



Рис. 3. Принцип работы с номограммой режимов пуска свежего УТР и останова

## 2. Номограммный метод расчета отравления теплового реактора самарием в режимах пуска свежего реактора и останова

Номограммные методы расчета в инженерной практике нашли широкое применение. Использование номограммы в расчете отравления самарием было впервые предложено в работе [1] для режима останова. Номограмма выполнена в относительных единицах реактивности, т.е. применима для любого теплового реактора и позволяет определять глубину прометиевого провала при останове с различного уровня мощности или фактической концентрации прометия. Чтобы определить абсолютное значение отравления самарием в прометиевом провале, необходимо умножить результат, снимаемый с номограммы на величину максимальной глубины прометиевого провала конкретного реактора. Для других режимов номограммы отсутствуют, хотя необходимость их очевидна.

Рассмотрим основные принципы составления номограммы [1] на примере УТР.

Накоплени... прометия при работе реактора на уровне мощности $N_i$ протекает по следующему закону

$$\frac{N_{Pm}(\tau)}{N_{Pm,0}}=\frac{N_i}{N_{ном}}\cdot\left(1-\exp\left(-\frac{\ln 2\cdot\tau}{T_{Pm}}\right)\right).$$

Именно эта величина будет определять потенциальную глубину прометиевого провала на момент останова

реактора $\rho_{ПП}(N_i)$. На рис. 2 это уравнение представлено $N_i/N$ ом кривых для разных уровней мощности с началом в нижнем левом углу.

Изменения реактивности в прометиевом провале в зависимости от времени стоянки $t_{СТ}$ будет иметь вид

$$c_{\epsilon\epsilon}(\tau_{\nu\otimes}) = c_{\epsilon\epsilon}(N_i)\cdot\exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{Pm}}\cdot\tau_{\nu\otimes}\right)$$

или с учетом уравнения (2)

$$c_{\epsilon\epsilon}(\tau_{\nu\otimes}) = c_{\epsilon\epsilon}^{\{ (}\cdot\frac{N_i}{N_{\{ (}}\cdot\exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{Pm}}\cdot\tau_{\nu\otimes}\right).$$

Это уравнение представлено рядом прямых для значений времени стоянки $t_{СТ}$ от 1 до 12 сут.

Номограмма [1] широко использовалась на практике и в настоящее время применяется для подготовки эксплуатационного персонала водо-водяных энергетических реакторов типа ВВЭР.

В работах [4, 5] на примере УТР ставилась задача создания номограммы расчета отравления самарием в режимах пуска свежего реактора и останова, что значительно расширяет возможности номограммных методов в определении самариевого отравления. Принципиальные схемы этих режимов представлены на рис. 1.

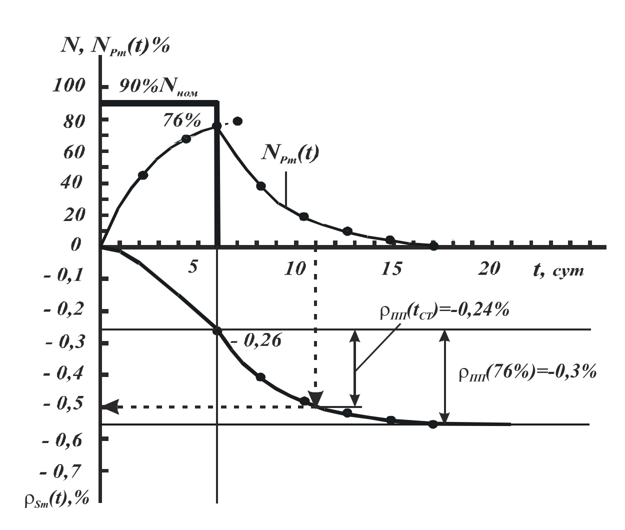



Рис. 4. Решение тестовой задачи графоаналитическим методом

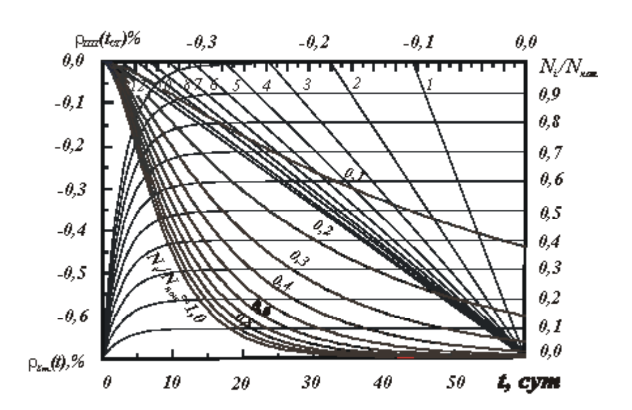



Рис. 5. Номограмма режимов пуска свежего УТР и останова

Отравление самарием в режиме пуска свежего реактора в зависимости от периодов полувыгорания Sm и Pm описывается следующим уравнением:

$$c_{Sm}(\tau) = c_{Sm,0}\left[1+\frac{T_{Pm}}{T_{Sm}-T_{Pm}}\exp\left(-\frac{\ln 2\cdot\tau}{T_{Pm}}\right)-\frac{T_{Sm}}{T_{Sm}-T_{Pm}}\exp\left(-\frac{\ln 2\cdot\tau}{T_{Sm}}\right)\right],$$

где период полувыгорания самария в соответствии с работой [2] имеет вид

$$T_{Sm} = \frac{\ln 2}{\nu\cdot\Phi_2} \approx \frac{16\cdot 10^{13}}{\Phi_2} = \frac{N_{\{(}}{N_2}\ сут.$$

Здесь $\Phi_2$ – средняя плотность потока нейтронов в реакторе, нейтрон/(см$^2$·с), соответствующая мощности $N_2$, %, на которой работает реактор (в этом режиме исходная мощность $N_1$=0).

На рис. 3 ур. (3) определяется серией кривых с началом в левом верхнем углу графи $N_i/N$ имости от относительного уровня мощности (3)

Принцип пользования номограммой показан на рис. 2 и 3 для нижеследующей н $N_{Pm}(\tau)$ арной зада $N_{Sm}(\tau)$ концентрация по прометию и самарию не достигла еще их равновесных значений.

Условный теплово $N$ со свежей загр $N_{\{(}$ топлива на мощности $=90\ \%$ от номинальной работал в течение 6 суток, а затем был остановлен. В режиме останова реактор находился еще 5 сут. $^{149}_{62}$Sm гся оценить потери реактивности на отравление на момент окончания 5 суток стоянки.

На рис. 4 эта задача решена графоаналитическим методом.

По номограмме, изображенно $\rho_{\epsilon\epsilon}(\tau_{XT})$ 2, можно найти только потерю реактивности в прометиевом провале на момент времени стоянки

Новая номограмма ( оме этого, учитывает потерю реактивности $\rho_{Sm}(\tau_{\diamond\langle})$ за счет $\tau_{\diamond\langle}$ вления самарием, накопившимся за время работы

Очевидно, что результат в отличие от графоаналитического метода достигается намного быстрее и определяется только суммированием показаний верхней и боковой шкал:

$$c_{\epsilon\epsilon}(\tau_{XT}) + c_{Sm}(\tau_{\diamond\langle}) =$$
$$= -0,242 - 0,258 = -0,5\ \%.$$

## Заключение

Предложена нова $^{149}_{62}$Sm грамма для определения отравления самарием в режимах пуска свежего реактора и его останова.

Точность номограммы можно улучшить, разбив ее на несколько интервалов по времени. Наиболее практически значимыми и удобными, на наш взгляд, шкалами t являются: интервалы времени – 0...12 и 0...60 суток. Первая номограмма со шкалой времени 0...12 суток (рис. 3) обеспечивает наиболее высокую точность в расчетах